

В.Т.Доманський¹, К.В. Переверзєв²¹*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна*²*ТОВ «ДАК-Енергетика», Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖИ І СТРУМОПРИЙМАЧІВ

Розроблені методи і моделі для дослідження стану контактної мережі. Шляхом імітаційного моделювання отримані статичні та динамічні показники якості струмозняття та стану контактної мережі. Проведені широкомасштабні експериментальні дослідження контактної мережі і розроблена методика оцінки якості струмозняття та стану контактних підвісок по залежностям контактного натиснення.

Ключові слова: *контактна мережа залізниць, експлуатація та діагностика, взаємодія з струмоприймачами.*

Постановка проблеми

В умовах ресурсозбереження значний ефект може дати перехід від обслуговування контактної мережі (КМ) по нормах до технічного обслуговування по стану на базі комплексної діагностики її елементів. Для підвищення якості діагностики і переходу до перспективного обслуговування необхідна розробка і удосконалення моделей відмов, навантажень, взаємодії КМ і струмоприймачів, та взаємозв'язок моделей, теорії і методів експлуатації, що охоплюють весь життєвий цикл КМ. Наведене вище і визначає актуальність теми досліджень роботи.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є удосконалення технологій обслуговування контактної мережі постійного струму по стану для забезпечення надійного і економічного струмозняття на електрифікованих залізницях. Для досягнення зазначеної мети необхідно:

- розробити моделі і алгоритми та провести імітаційне моделювання для оцінки значущості критеріїв стану контактних підвісок з урахуванням їх взаємодії зі струмоприймачами;
- виконати експериментальні випробування взаємодії контактної мережі зі струмоприймачами і зіставити експериментальні дані з результатами імітаційного моделювання основних параметрів для оцінки значущості критеріїв стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Взаємодія КМ зі струмоприймачем являє складний коливальний процес, у якому взаємодіють різноманітні коливальні системи – дві з них з

розподіленими параметрами (залізнична колія та КМ) та декілька систем з умовно-зосередженими параметрами (локомотиви та струмоприймачі).

Точки контакту полів струмоприймача з контактним проводом (КП), що найбільше цікавлять нас, здійснюють коливання, що обумовлені параметричним збудженням з боку КМ внаслідок періодичної зміни її параметрів, а з боку локомотиву – взаємодією струмоприймачів, що коливаються, на основи яких передаються коливання колії та електрорухомого складу. Окрім того, уздовж КМ в обох напрямках від точки прикладання контактного натискання кожного із струмоприймачів розповсюджуються хвилі коливань, що впливають на взаємодію підвіски з іншими струмоприймачами. На коливальну систему також впливають випадкові фактори, такі як вплив вітрових навантажень, розрегулювання КМ та ін. [1-4]. Для співставлення повноцінних моделей, що дозволяють провести оцінку стану КМ у процесі взаємодії із струмоприймачем необхідно використовувати аналітичні центри філії «Центр діагностики залізничної інфраструктури» АТ «Укрзалізниця». Такий підхід дозволить здійснити накопичення каузальних знань для експертних систем аналітичних центрів тягової енергетики.

Існуюче різноманіття моделей розрахунку динамічної взаємодії КМ та струмоприймачів можемо розподілити на аналітичні та імітаційні. У свою чергу, аналітичні моделі поділяються на моделі із зосередженими та з розподіленими параметрами. Моделі взаємодії із зосередженими параметрами не задовольняють потребу у більш точних результатах розрахунків динамічної взаємодії струмоприймачів та КМ. Для проектування та аналізу поведінки КМ слід

застосовувати моделі, що враховують розподілені параметри КМ та велику кількість зовнішніх факторів впливу. Моделі динамічної взаємодії з врахуванням розподілених параметрів можуть враховувати практично весь необхідний обсяг вихідних даних та дозволяють отримувати на виході усю інформацію про процес струмозняття (контактне натискання, точки та час відривів, амплітуду коливань, координати місць контакту та проводів КМ уздовж анкерної ділянки), проте при формуванні цих моделей використовується складний математичний апарат. Бажано, щоб модель взаємодії струмоприймачів з КМ мала б єдину структуру для статичних та для динамічних розрахунків.

Моделі струмозняття вдосконалювались завдяки врахуванню більшої кількості факторів та зняття більшого числа припущень. Найменша кількість припущень була досягнута у кінцево-елементних моделях, проте такі моделі мають велику розмірність та вимагають більших обчислювальних ресурсів сучасних ЕОМ для оцінки стану КМ у процесі її експлуатації. У випадку з використанням моделі, що має за основу метод кінцевих елементів [5] КМ поділяється на елементи, що взаємопов'язані з'єднувальними механізмами, що піддаються опису за допомогою математичних виразів. Як результат, формується система диференціальних рівнянь, що дозволяє моделювати КМ із заданою точністю. Для динамічних обчислень, як це наведено у [6] КП поміж струнок не розподіляється на окремі елементи, та приймається як стрижень або нитка. Це забезпечує достатню деталізацію моделі, але може привести до похибок, особливо при моделюванні впливу параметрів на великих частотах.

Метод використання частотно-залежних кінцевих елементів має за основу вищенаведену модель та призначений для зменшення порядку матриць, що використовуються для аналізу високочастотних процесів при збереженні універсальності у використанні [7]. Рівняння натягнутої нитки вирішується аналітично на рівні елементів, а тому не вимагається розділяти на міжстрункові ділянки контактний провід КП. Частотно-залежні матриці складаються для всієї ділянки КМ та включають у себе елементи (фіксатори, затискачі, консолі) як окремі маси або елементи, що здійснюють коливання. Це дозволяє промодельовати будь-яку систему КМ. В цьому методі основних зусиль вимагає розрахунок власних частот та векторів, але це виконується лише один раз для заданої конфігурації КМ.

Найбільшу практичну цінність являють собою імітаційні моделі динамічної взаємодії струмоприймачів з КМ компанії Siemens, що

враховують такі процеси як переміщення точок підвішування проводу, відрив струмоприймача від контактного проводу та наявність другого паралельного КП. Взаємодія всієї маси проводу та зосереджених мас клем, підвісів, ізоляторів і живлячих проводів включено в розрахунок разом з поперечними зусиллями в підтримуючих конструкціях. Всі описані припущення, такі як відмінність в висоті точок підвісу, зміна натягу проводів і багато інших можуть бути включені в розрахунки. На додаток до статичного стану КМ також розраховується, коли і як довго зміщується кожна точка підвісу і в якій точці кожен полоз струмоприймача відривається і знову набуває контакту. Подібним чином розраховується контактне натискання між КП і полозом струмоприймача.

Модель ST3 + OP2, описана в [8], заснована на такому розгляді ділянки КМ, при якому струмоприймачі завжди знаходяться під її сегментами. Крім імітації динамічної взаємодії декількох струмоприймачів з КМ, модель ST3 + OP2 дозволяє також досліджувати поширення коливань в КМ та відбитку хвиль. Введення показника "наявності" дозволяє також включати і вимикати довільний струмоприймач під час розрахунків.

У Міланському технічному університеті на замовлення Італійських залізниць виконано моделювання процесів взаємодії струмоприймача з КМ при швидкостях руху до 250 км/год [12]. Розрахунок був проведений для двох базових типів струмоприймачів FS52 і DSA350S відповідно симетричного і асиметричного виконання. Моделювання проводилося для ланцюгової компенсованої КМ з двома КП. Значення натискання струмоприймача на перший і другий КП при швидкості 250 км/ч в середньому дорівнює 175 Н при середньому квадратичному відхиленні 42 Н.

У відомій моделі динаміки КСТ-УрГУПС, розробленої під керівництвом А.В. Єфімова [10], на анкерну ділянку доводиться близько 6000 кінцевих елементів. Гібридність моделі є її відмінною рисою і обумовлена введенням кінцевих елементів двох типів: з зосередженими параметрами і континуальних. Поділ елементів за властивостями просторової протяжності дозволяє отримати принципово нову можливість поділу розрахунків на дві складові. Спочатку вирішується модель з зосередженими кінцевими елементами, отримані результати розрахунку стають вихідними даними для розрахунку поведінки континуальних елементів моделі. Час розрахунків при довжині анкерного ділянки 800 м досягає від 8 до 10 год. На основі принципу поділу моделі на дискретні і континуальні елементи А.Г. Галкіним запропонована гібридна квазі-динамічна модель [11], в якій дискретні

точкові кінцеві елементи, з'єднані між собою континуальними елементами, перебувають тільки в місцях вузлів структурної моделі топології КП. Модель заснована на синтезі моделі методу кінцевих елементів А.В. Єфімова та модифікованої методики Власова-Марквардта [1] і дозволяє враховувати будь-яку КМ: просту, ланцюгову, складну з урахуванням кінцевого числа струн, різних конструкцій підпорного вузла, будь-яке кінцеве число струмоприймачів. Час розрахунку показників якості струмознімання для анкерної ділянки протяжністю 1600 м складає від 1 до 2 хв.

Як результат аналізу математичних моделей та методів розрахунку у поєднанні з експериментальними дослідженнями по взаємодії струмоприймачів з КМ можна заключити, що достовірність результатів моделювання підвищується якщо у розрахунках враховувати реальні значення нахилів КП, відхилення їх стріл провисання від рекомендованих значень, зосереджені маси та інші характерні особливості розглядаємої системи. Для оцінки стану КМ

електрифікованих залізниць України найбільш притаманно використовувати імітаційну модель КСТ – УРГУПС. Ця модель найбільш точно зображає реальний процес та використовується зараз для проектування, налагодження та експлуатації КМ електрифікованих залізниць з колією 1520 мм.

Виклад основного матеріалу

Моделювання взаємодії струмоприймача і контактних підвісок із застосуванням частотно-залежних кінцевих елементів

В роботі удосконалені моделі і алгоритми імітаційного моделювання для оцінки стану КМ. В їх основу покладено кінцево елементні моделі взаємодії КМ із струмоприймачами [3, 12]. В загальному випадку більш 15 параметрів впливають на поведінку струмоприймача та 35 на контактну підвіску (рис. 1, а).

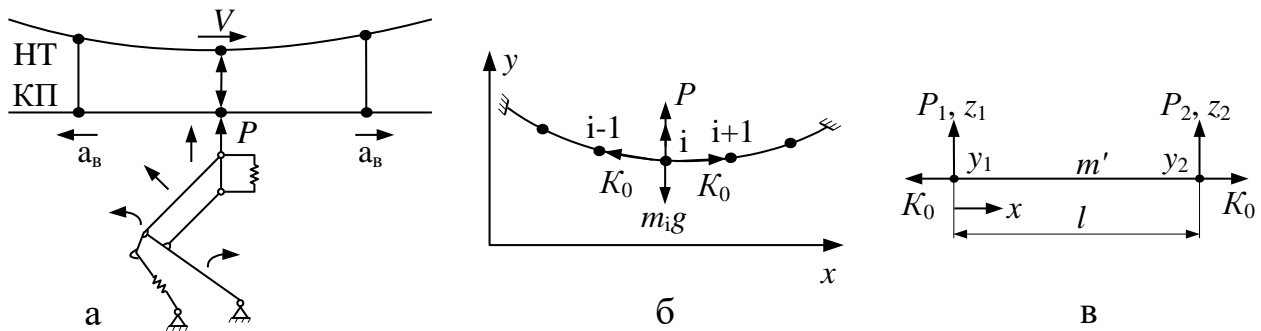


Рис. 1. Схема взаємодії контактної підвіски з струмоприймачем (а), сили які діють на i -ю масу (б), схема провідного елемента (в)

Найменше число допусків досягнуто в кінцево елементній моделі, проте такі моделі потребують великих ресурсів сучасних ЕОМ. Модель представляє собою систему зв'язаних кінцевих елементів, яка по своїй геометрії співпадає зі схемою проводів і тросів контактної підвіски. В моделі можуть бути скупчені маси (затискачі, струни, фіксатори, ізолятори). Кінцевий елемент моделі проводу описується координатами центру мас X_i , Y_i , кутом розміщення відносно вісі OX - α_i та силами, які діють на нього (рис. 1, б). В основі моделі лежать системи рівнянь, які описують стан кожного елемента. Для дослідження динамічних процесів вирішувалась система із 6000 диференціальних рівнянь для анкерної ділянки. З метою зниження порядку матриць пропонується використання частотно-залежних кінцевих елементів. Провідний елемент довжиною l з питомою масою m' (рис. 1, в), розтягнутий між

точками 1 і 2 силою K_0 . Рівняння переміщення пружної нитки в застосуванні до цього елемента матиме вигляд $m''\ddot{y} - K_0 y'' = 0$, яке перетворюється у частотно залежне $K_0 z'' + m' \omega^2 z = 0$. Рішення в загальному вигляді матиме вид $z(x, \omega) = A \sin \beta x + B \cos \beta x$. 3 врахуванням $\beta = \omega / \sqrt{K_0 / m'}$ і граничними умовами $z = z_1$ для $x = 0$ і $z = z_2$ для $x = l$ отримуємо $z = z_1 (\cos \beta x - \operatorname{ctg} \beta l \sin \beta x) + z_2 \sin \beta x / \sin \beta l$. Рівняння рівноваги сил

$$P_i = P_i^T + P_i^R. \quad (1)$$

Розділяючи параметри і застосовуючи

передавальні функції g_i і g_k отримуємо

$$P_i^T = -\omega^2 \cdot \sum_k m'_k z_k \int_0^l g_i g_k dx. \text{ Для відомих}$$

мас заміщення вираз перетвориться в

$$P_i^T = -\omega^2 \sum_k m_{ik} z_k, \text{ де } m_{ik} = m' \int_0^l g_i g_k dx.$$

Аналогічно цьому коефіцієнти еластичності пружин описуються

$$P_i^R = \sum_k z_k \cdot K_0 \int_0^l g'_i g'_k dx = \sum_k \bar{c}_{ik} z_k. \text{ Таким}$$

чином рівняння, що описує коефіцієнти еластичності в точках зв'язку, визначається виразом

$$\bar{c}_{ik} = K_0 \int_0^l g'_i g'_k dx, \text{ а в матричному вигляді}$$

рівняння рівноваги сил (1) має вигляд

$$P = (-\omega^2 M + C)Z = \bar{C}(\omega)Z \quad (2)$$

Система рівнянь (2) вирішується за допомогою власних векторів шляхом визначення власних частот, використовуючи $\det[\bar{C}(\omega_n)] = 0$. Власні вектори системи, відповідні власним частотам матимуть вигляд $\bar{C}(\omega_n)Z = 0$. Зовнішні сили $P(t)$ враховуються в дискретному рівнянні руху

$$M(\omega_n)\ddot{y}_n(t) + D(\omega_n)\dot{y}_n(t) + C(\omega_n)y_n(t) = P(t) \quad (3)$$

Рівняння (3) вирішується окремо для кожної власної частоти. Для вирішення цього рівняння, рух замінюється модальними вузловими реакціями $y_n(t) = Z_n q_n(t)$, які приводять до виразу

$$\ddot{q}_n + 2\xi\omega_n\dot{q}_n + \xi\omega_n^2 q_n = \frac{1}{m_n} \sum_i P_{oi} W_i,$$

де модальна маса $m_n = Z_n^T M(\omega_n) Z_n$, вагова функція прикладення сил збудження між вузлами i , k

$$W_{ik} = z_{ni}(\cos(\beta_n x) - \text{ctg}(\beta_n l) \sin(\beta_n x)) + z_{nk} \sin(\beta_n x) / \sin(\beta_n l)$$

, $\beta_n = \omega_n / a_p$, a_p – швидкість розповсюдження хвилі відповідних провідників КП. Застосування незалежних від часу систем матриць в частотній розмірності, не вимагає великий об'єм обчислень для моделювання реальної сили натиснення.

Кінцевий елемент (відізок проводу) (рис. 2, а) може бути представлений різними моделями: натягнутою гнучкою ниткою з однорідної лінійної щільністю; жорстким стрижнем з однорідної лінійної щільністю (стрижні пов'язані між собою шарнірами); натягнутими стрижнями, що працюють на вигин; елементарною масою, пов'язаної з сусідніми масами гнучкими невагомими нитками; елементарною масою, пов'язаної з сусідніми масами невагомими, абсолютно жорсткими, шарнірно з'єднаними стрижнями, і т. д.

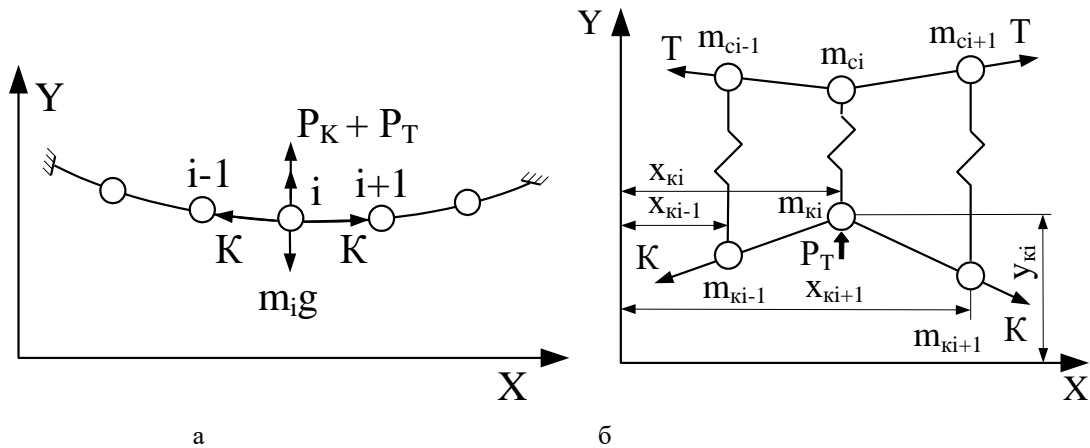


Рис. 2. Сили що діють на i -ю масу (а); врахування струнок у моделі взаємодії (б)

Сполучені між собою кінцеві елементи утворюють сітку, яка за своєю геометрією збігається зі схемою модельованої КП. У модель можуть бути

включені будь-які зосереджені маси (затискачі, струни, фіксатори, ізолятори і т. д.)

$$\begin{cases} -m_i g + K_{i+1} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + K_{i-1} \frac{y_{i-1} - y_i}{x_i - x_{i-1}} + P_{YT} = 0 \\ K_{i+1} \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} + K_{i-1} \frac{z_{i-1} - z_i}{x_i - x_{i-1}} + P_{ZT} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

де x_i, y_i, z_i – координати i -го кінцевого елементу; K_{i-1} , K_{i+1} – натяг проводу з боку $i-1$ і $i+1$ -го елементів відповідно.

$$K_{i+1} = K + ES \left(\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} - l_{i+1} \right),$$

$$K_{i-1} = K + ES \left(\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} - l_{i-1} \right), \quad (5)$$

де l_i – довжина i -го елемента при прикладенні до нього натягу K ; ES – добуток модуля пружності матеріалу проводу на його перетин; P_T – зовнішня сила, що діє на i -й елемент, наприклад, сила натискання струмоприймача.

Фіксатори враховуються у вигляді (4) зміняться

$$-m_{ki} g + P_T + K_{i+1} \frac{y_{ki+1} - y_{ki}}{x_{ki+1} - x_{ki}} + K_{i-1} \frac{y_{ki-1} - y_{ki}}{x_{ki} - x_{ki-1}} + (Lc - y_{ni} + y_{ki})c = 0,$$

де $y_{ki-1}, y_{ki}, y_{ki+1}, y_{ni}$ – вертикальні координати елементів КП з індексами $i-1, i, i+1$, а також несучого тросу відповідно; Lc і c – відповідно, довжина та жорсткість струнки.

Для зменшення впливу межових ефектів, модель повинна містити крім розрахункового два додаткових прольоти (один праворуч від розрахункового, інший ліворуч). Еластичність КМ матиме дві складові: еластичність, викликану спільною дією КП та проводів, з'єднаних з ним струнами, та еластичність, яка визначається міжструнковим прольотом КП. У разі розвантаження струнок довжина міжстрункового прольоту збільшується. Відповідно першу складову еластичності $\eta_{доп}$ будемо знаходити, вирішуючи кінцево-елементну модель з дискретними кінцевими елементами. Еластичність континуальних елементів КП в міжструнковому прольоті $\eta_{МС}$ знайдемо за

$$R_j = \frac{x_{cj+1} - x_{cj} - 1}{2} g_{ki} - K_{i+1} \frac{y_{ki+1} - y_{ki}}{x_{ki+1} - x_{ki}} + K_{i-1} \frac{y_{ki-1} - y_{ki}}{x_{ki} - x_{ki-1}},$$

де x_{cj+1}, x_{cj} – координати струнок відповідно наступної і попередньої поблизу розрахункової; g_k – питома вага контактного проводу.

За останнім підграфом генеруються коефіцієнти системи лінійних рівнянь. При цьому знайдені реакції струнок підставляються в рівняння, що відповідають вузлам зі струнками в якості

невагомих жорстких стрижнів, половина маси яких зосереджена в кінцевому елементі контактного проводу в місці підключення фіксатора. Струнки враховуються невагомими нелінійними пружними елементами (рис. 2, б). У цьому випадку рівняння (4) зміняться

відомою формулою

$$\eta_{МС} = x_T(l - x_T)/(KI), \quad (6)$$

де x_T – відповідна координата струмоприймача у міжструнковому прольоті; l – довжина міжстрункового прольоту.

Результуюча еластичність дорівнюватиме сумі еластичностей

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{доп} + \eta_{МС}. \quad (7)$$

Порядок розрахунків може бути наступним. Спочатку на основі відомих моделей розміщення струнок в прольотах КМ для заданої анкерної ділянки генерується структурна модель у вигляді графа. Потім з графа анкерної ділянки виділяється підграф КП та знаходяться реакції струнок. Вертикальні реакції струнок дорівнюватимуть

зосереджених сил. В результаті рішення системи рівнянь виходять координати всіх вузлів на несучому тросі і інших проводах (крім контактний проводу). Віднімаючи координати вузлів контактний проводу з відповідних їм по струнках координат вузлів інших проводів, знаходимо вектор довжин струн.

Повний граф анкерної дільниці з вектором довжин струнок дозволяє згенерувати матрицю коефіцієнтів системи лінійних рівнянь. При цьому, якщо є струмоприймач, то він також враховується зосередженої силою. Якщо струмоприймач розташовується точно під вузлом, то уся сила прикладається до цього єдиного вузла. Якщо струмоприймач перебуває між двома вузлами КП, то сила його натискання розкладається між ними зворотно-пропорційно відстаням до цих вузлів. Частина сили натискання струмоприймача, що передається на i -й елемент контактної провуду, при розташуванні струмоприймача між елементами i та $i+1$ може бути знайдена за формулою $P_{Ti} = (x_{i+1} - x_T) P_T / (x_{i+1} - x_i)$, де x_T – координата струмоприймача; x_i і x_{i+1} – координати елементів контактної провуду.

Розвантаження струнки призводить до біфуркації моделі. Якщо реакція струнки стала негативною, то таку струнку необхідно видалити з моделі (це призведе до виключення відповідного вузла і об'єднання двох ребер).

В основі гібридної квазідинамічної моделі лежить принцип поділу кінцевих елементів на дискретні і континуальні. Розрахунок розділяється на два етапи (рис. 3). Спочатку кожного кроку обчислень розраховується динаміка з моделлю підвіски у вигляді графа вузлів і віток $1 \rightarrow 2$, потім в 2 отримані координати Y і Z всіх кінцевих елементів фіксуються і відбувається розрахунок еластичності,

а струмоприймач зміщується в наступну точку контактної провуду $2 \rightarrow 3$. Зсув струмоприймача $2 \rightarrow 3$ розраховується як динамічне завдання при статичному положенні КП. Потім фіксується координата X струмоприймача 3 і розраховується наступний крок моделі.

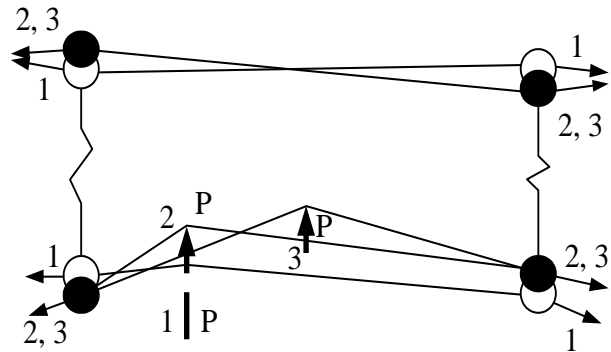


Рис. 3. Схема квазідинамічного алгоритму

Моделю динаміки логічно виходить з моделі статички додаванням нових доданків. Перш за все, це добуток прискорення точки на її масу і швидкості точки на коефіцієнт в'язкого тертя v . Сила $P(t)$, що діє на точку, є функцією часу. Додаток від передавання сил з одного провуду на інший (в даному випадку, з контактної на несучий трос) і навпаки врахована останнім доданком. Ця сила в рівнянні для площини ZOX через незначні кути нахилу струнок пропорційна тангенсу кута.

$$\begin{cases} -mg + \ddot{y}_i m - \dot{y}_i v + K_{i+1} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + K_{i-1} \frac{y_{i-1} - y_i}{x_i - x_{i-1}} + P_y(t) + (Lc - y_{ni} + y_{ki})c = 0 \\ \ddot{z}_i m - \dot{z}_i v + K_{i+1} \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} + K_{i-1} \frac{z_{i-1} - z_i}{x_i - x_{i-1}} + P_z(t) + \frac{z_{ni} - z_{ki}}{y_{ni} - y_{ki}} (Lc - z_{ni} + z_{ki})c = 0 \end{cases}$$

Таким чином в залежності від вимог швидкості, точності і надійності при оцінці стану параметрів КП можна використовувати різні моделі.

Структурування та взаємозв'язок механічного та електричного розрахунку контактної підвіски

Питомий електричний знос спостерігається при великій щільності струму (5–10 А/мм²), в місцях відриву струмоприймача від КП, зниження контактної тиску [2–4]. Чим вище щільність

робочих струмів, тим інтенсивніше тепловий знос. Все вище сказане говорить про необхідність спільного механічного та електричного розрахунку і моделювання. Електрифікована ділянка залізниці описується двома групами моделей: механічні й електричні, які топологічно накладаються один на одного. Механічна структура ліній передбачає їх поділ на анкерні ділянки. Анкерні ділянки, в свою чергу діляться на точки підвісу (рис. 4, а). Точка підвісу – це місце фіксації провідів або деталей лінії на будь-якій опорній конструкції.

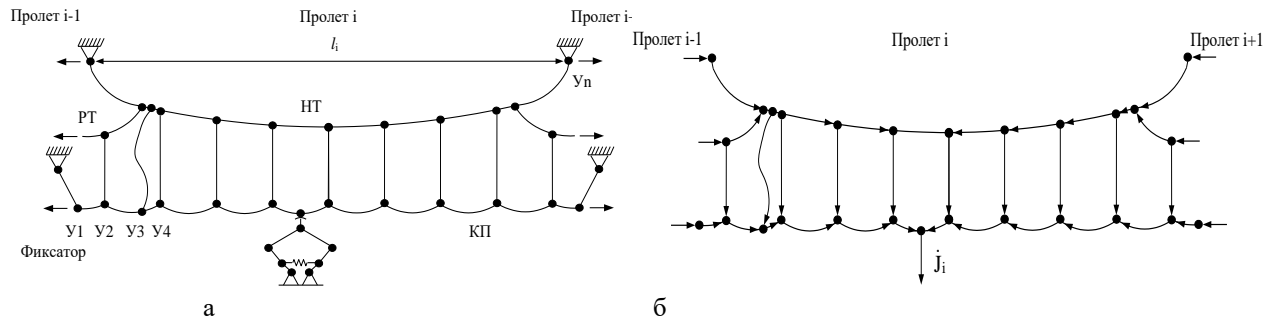


Рис. 4. Мультиграф механічної взаємодії контактної підвіски і струмоприймачів в прольоті анкерної ділянки (а); направлений мультиграф струмів підвіски в прольоті анкерної ділянки (б)

Проліт контактної підвіски представлено мультиграфом просторової структури, вузлами якого є місця з'єднання окремих елементів між собою і точки підвісу. Вітки мультиграфа це протяжні елементи проводів і тросів, а також конструкції, наприклад, фіксатори, струни. У загальному випадку анкерна ділянка складається з m прольотів, сполучених між собою послідовно. Направлений мультиграф електричної схеми прольоту (рис. 4, б) дозволяє по відомим матричним виразам визначити струми в вітках схеми \dot{I}_b , втрати потужності $\Delta \dot{S}$ та енергії $\Delta \dot{W}$ і оцінити тепловий нагрів кожного елементу анкерної ділянки [14, 15].

Результати імітаційного моделювання

Шляхом імітаційного моделювання отримані статичні та динамічні показники якості струмозняття для експериментальної ділянки Південної залізниці. Імітаційне моделювання виконане при швидкостях руху 80, 100, 120, 140, 160 км/год та різних значеннях натягу КП 11; 10; 9; 8 кН і зносу 7,5; 15; 22,5; 30 % з регулюванням і без регулювання струн. Багатоваріантні статичні і динамічні розрахунки (всього 44 варіанти) виконані з метою визначення технічних критеріїв стану КМ і критеріїв якості струмозняття, що визначають

ресурсозбереження [16].

При незмінності довжин струн і зниженні натягу КП при його зносі з'являються негативні стріли провисання КП (табл. 1). Зміна довжини струн в процесі зниження натягу КП виключають це явище. Хвилеподібну характеристику натиснення (рис. 5, а) з ознаками симетрії щодо середини прольоту можна пояснити циклічною неоднорідністю динамічних властивостей підвіски уздовж прольоту. Змінюючи довжину і натяг ресорного троса, число, довжину і місце кріплення струн можна вирівняти статичну еластичність підвіски і добитися більшої динамічної однорідності. Розповзання гістограм натиснення (рис. 5, б) характеризує розмах вертикальних коливань струмоприймача із збільшенням швидкості і як наслідок зростання відривів його від КП. Для підвіски, яка знаходиться в експлуатації, зростання відривів мало змінюється в межах швидкостей від 0–100 км/год і 120–160 км/год, а в діапазоні швидкостей 100 до 120 км/год спостерігається різке їх підвищення. Під час переходу струмоприймачів від однієї анкерної ділянки до іншого (підкети 4251–4311) і в прольоті середньої анкерівки (підкети 4651–4751) спостерігаються максимальні значення натиснення струмоприймачів 175 і 197 Н відповідно для ТЛ-13Л і 2SLS-1 при швидкості руху 160 км/год.

Таблиця 1

Статичні параметри

| Натяг КП, Н | Знос КП, % | Стріла провисання, м | Коеф. нерів. еластич. |
|----------------|---------------|-------------------------|--------------------------|
| 12 | 0 | 0,580/0,036* | 1,697 |
| 11 | 7,5 | 0,568/0,017* | 1,729 |
| 10 | 15 | 0,555/-0,185* | 1,766 |
| 9 | 22,5 | 0,539/-0,166* | 1,809 |
| 8 | 30 | 0,522/-0,147* | 1,860 |

Примітка: * - НТ / КП

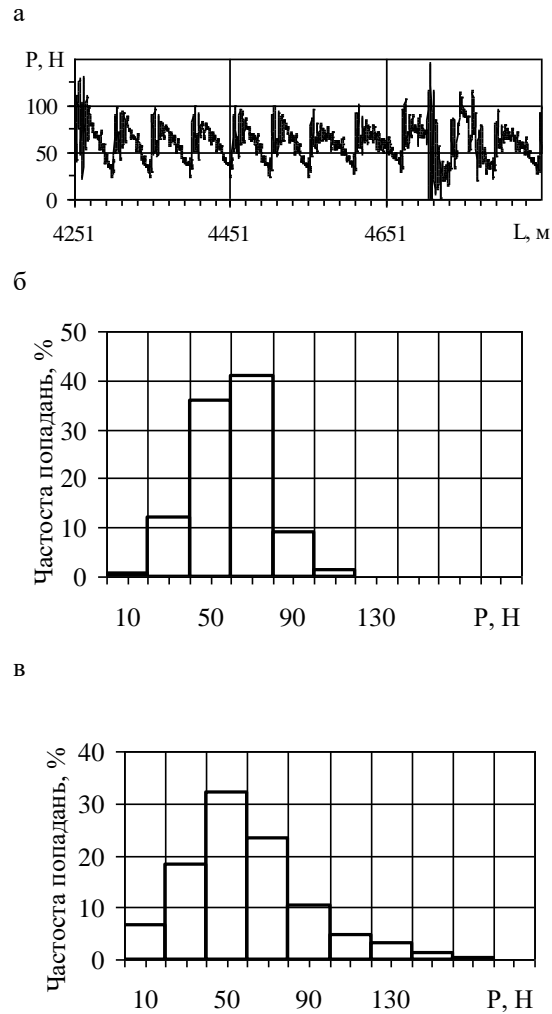


Рис. 5. Контактне натиснення (а), гістограми розподілу (б) 80 км/год, (в) 160 км/год

Порівнюючи реалізації контактного натиснення, отримані для різних струмоприймачів, можна відзначити, що вони дають схожу картину проходу струмоприймача під опорою. При цьому в районі першої простої струни спостерігається викид натиснення величиною близько 140 Н. Середнє натиснення для струмоприймача ТЛ-13Л складає 59,3 Н, а струмоприймача 2SLS-1 – 64,7 Н, середнє квадратичне відхилення 29,5 Н і 31,8 Н відповідно. При практично стабільному середньому значенні контактного натиснення анкерної ділянки в діапазоні зміни швидкостей руху від 80 до 160 км/год спостерігається зростання статистичного максимуму $M[P] + 3\sigma[P]$ і мінімуму $M[P] - 3\sigma[P]$ з максимальним значенням при резонансній швидкості руху 120 - 140 км/год. Максимальні значення натиснень при швидкостях 80, 120, 160 км/год збільшуються і відповідно швидкостям такі: 154, 183, 175 Н.

На імітаційній моделі отримані залежності

коефіцієнта відривів від зносу КП від різних факторів (K_e). Аналіз K_e показує, що при швидкостях руху 120, 160 км/год спостерігається значне зростання числа відривів струмоприймача від КП. Практично в 3 рази більше, ніж при незношеному КП. Підвищення якості струмозняття при зносі КП можна забезпечити регулюванням контактної підвіски з визначеними на моделі раціональними довжинами струн в прольотах анкерної ділянки тільки при швидкості руху 80-100 км/год. Це значить, що для швидкісного руху використання існуючої контактної підвіски без модернізації не можливо.

Результати експериментальних досліджень взаємодії КМ і струмоприймачів

Нові можливості дослідження взаємодії КМ із струмоприймачами відкриває розширення функцій вагон-лабораторій випробувань контактної мережі

(ВВКМ) в області вимірювання і оцінки основних критеріїв якості струмозняття – натиснення струмоприймача і коефіцієнтів ненадійності і економічності. Для вимірювання висоти і горизонтального положення КП в плані (зигзаг, винос) застосовувалася стереотелевізійна система ВВКМ. Для визначення натиснення струмоприймача на КП застосовувалася система вимірювання, яка побудована на базі тензометричних датчиків сили ZF50кГ, що встановлені на полозі струмоприймача ВВКМ. У безпосередній близькості від датчиків сили на

полозі встановлено два датчики прискорення, які призначені для вимірювання вертикальних прискорень струмоприймача. Вимірювання висоти, положення КП в плані і контактного натиснення виконані для численних ділянок КМ із задовільним і незадовільним регулюваннями контактних підвісок. Наприклад, при швидкості руху 75 км/год зафіксована різка зміна натиснення на опорі № 218 (рис. 6). Результати вимірювання контактного натиснення показують що при якісному регулюванні контактної підвіски різких переміщень струмоприймачів не відбувається.

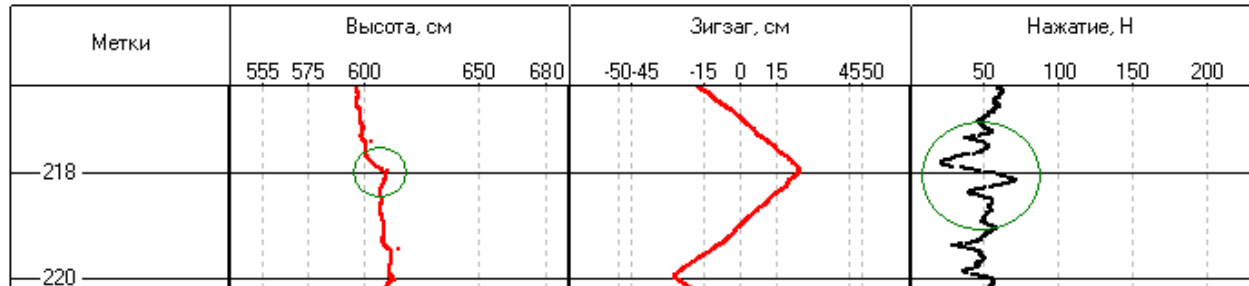


Рис. 6. Графіки висоти, зигзага, натиснення на ділянці Березань – Переяславська

Проведено ретельний аналіз найважливішого питання – порівняння результатів імітаційного моделювання взаємодії КМ і струмоприймачів з даними експериментальних досліджень, які проводились на ділянках залізниць. Експериментальні результати залежать від багатьох випадкових причин. Позбавитися від випадковості можна було б усередненням по безлічі реалізацій,

але такої можливості немає, тому що кількість поїздок обмежена програмою випробувань.

На рис. 7 наведені результати виміру геометричних параметрів та натиснення КП з використанням ВВКМ, а на рис. 8 натиснення вимірювального струмоприймача на контактну підвіску.

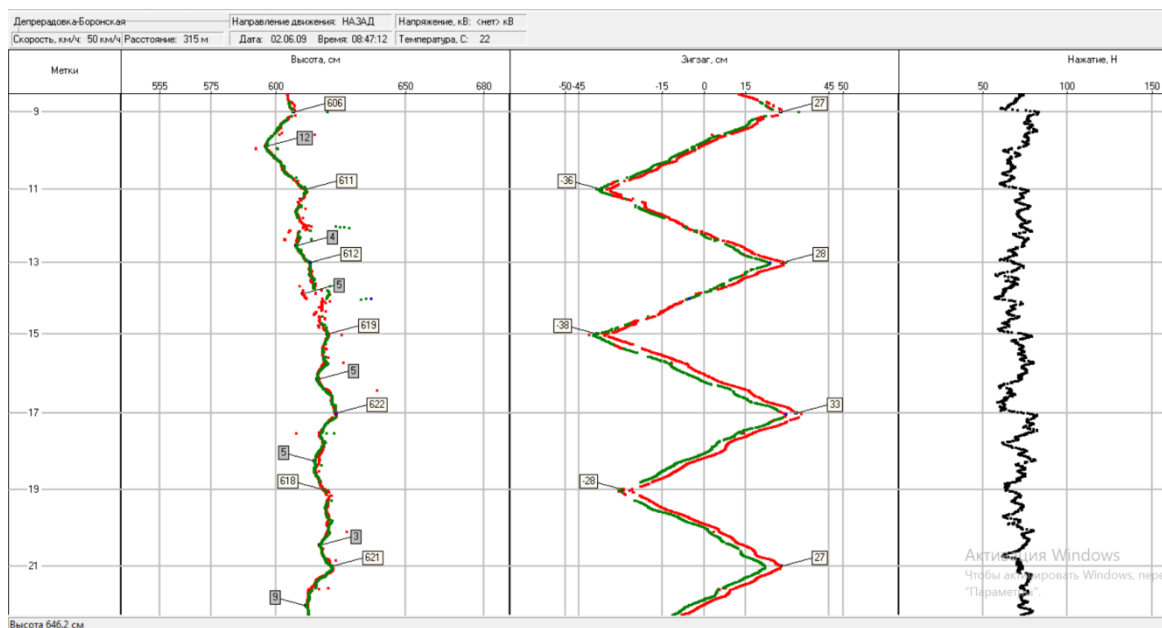


Рис. 7. Експериментальні геометричні параметри КП та натиснення на дільниці Депрерадовка-Баронська за швидкості 50 км/год у літній період

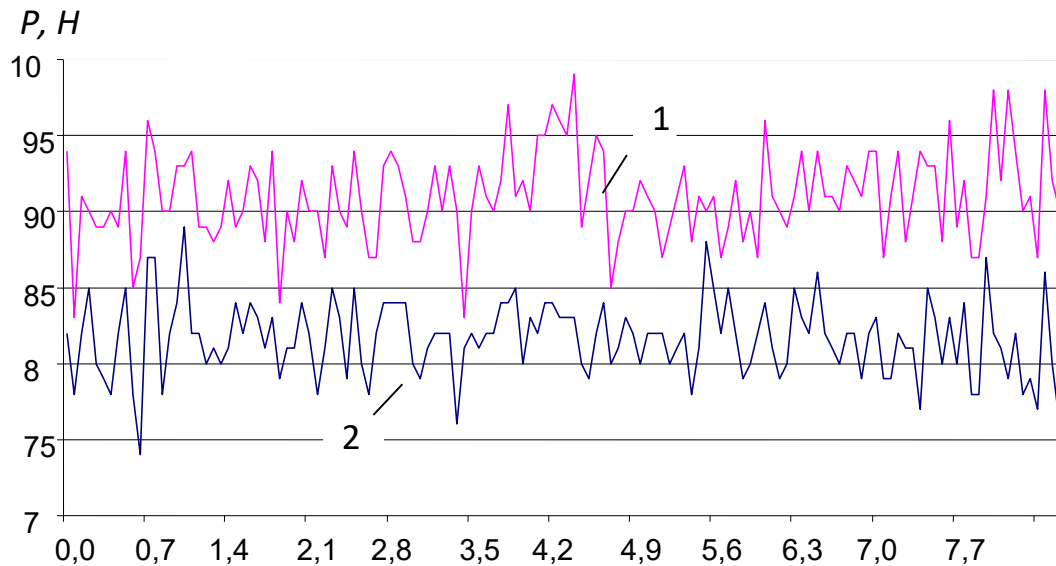


Рис. 8. Натиснення вимірювального струмоприймача на контактну підвіску ПБСМ-95+2МФ-100 ділянки Форпостна – Святогірськ, Краснолиманської дистанції електропостачання Донецької залізниці:

1 – $P = f(l)$ при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $P = f(l)$ при $t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Просте поєднання експериментальних і модельованих залежностей контактного натиснення струмоприймача ТЛ-13Л при різних швидкостях руху в прольотах анкерних ділянок і на всіх анкерних ділянках показує їх деякі розбіжності. В той же час різниця математичних очікувань контактного натиснення на анкерній ділянці при моделюванні і експерименті складає 5 %. У табл. 2 приведені статистичні дані залежностей контактного натиснення в процесі струмозняття на експериментальній анкерній ділянці. Найточнішим показником якості струмозняття при статичній обробці кривих контактного натиснення є дотримання умови $M[P] - 3\sigma[P] \geq P_{\min\text{доп}}$, де $P_{\min\text{доп}}$ – мінімальне допустиме значення контактного натиснення. Як показує досвід для

оцінки якості динаміки струмозняття досить користуватися абсолютним значенням максимальної змінної складової контактного натиснення $|P_v|_{\max}$.

Тоді коефіцієнт відносної зміни натиснення можна представити виразом $n = |P_v|_{\max} / M[P]$.

Характеризуючи експлуатаційний стан КМ по параметру контактного натиснення має сенс розглядати всі показники n , $\sigma[P]$, $|P_v|_{\max}$.

Розроблена методика оцінки якості струмозняття і експлуатаційного стану КМ на основі статистичної обробки баз даних кривих контактного натиснення і показано, що за рахунок раціонального натягу КП, можна забезпечити необхідну якість струмозняття і понизити знос контактуючих елементів.

Таблиця 2

Контактне натиснення

| Показник | Значення |
|---------------------|--------------|
| P_{\max} , Н | 83,00/82,68 |
| P_{\min} , Н | 27,00/20,90 |
| $M[P]$, Н | 57,10/59,84 |
| $s[P]$ | 8,88/18,75 |
| $M[P] - 3\sigma[P]$ | 30,46/36,05 |
| $M[P] + 3\sigma[P]$ | 83,73/116,09 |
| K_{σ} | 0,10/0,26 |
| n | 0,45/1,55 |

Примітка: чисельник – експеримент, знаменник – імітаційне моделювання

Висновки

1. Вдосконалені моделі і алгоритми імітаційного моделювання стану КМ з використанням кінцево-елементних моделей її взаємодії із струмоприймачами, які відрізняються від відомих застосуванням частотно залежних кінцевих елементів і структуризацією механічних і електричних графів анкерних ділянок.

2. Проведені багатоваріантні експерименти на імітаційній моделі по дослідженню впливу параметрів КМ і струмоприймачів на показники якості струмозняття для ділянок залізниць.

3. Проведена оцінка якості струмозняття і експлуатаційного стану КМ при взаємодії зі струмоприймачем на основі статистичної обробки баз даних кривих контактного натиснення, вимірюваних вагон-лабораторій випробувань контактної мережі в процесі об'їзду головних колій залізниць. Експериментально підтверджено, що при перевищенні статистичного мінімуму контактного натиснення його мінімально допустимого значення за рахунок раціонального натягу контактних проводів забезпечується необхідна якість струмозняття та понижений знос контактуючих елементів.

4. Запропоновані інформаційні технології оцінки стану контактних підвісок в процесі їх експлуатації на базі синтезу двох джерел інформації: діагностування в режимі реального часу і імітаційного моделювання.

Література

1. Марквардт, К. Г. Контактная сеть [Текст] / К.Г. Марквардт – 4-е изд. – М.: Транспорт, 1994. – 335 с. – (Учебник для вузов ж.д. транспорта).
2. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В.П. Михеев – М.: Маршрут, 2003. – 416 с. – (Учебник для вузов ж. д. транспорта).
3. Kiesling, F., Puschman, R., Schmieder, A. (2001) Contact lines for electric railways planning design implementation. Berlin and Munich. Siemens, 822.
4. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети [Текст] / В.А. Вологин – М.: Интекст, 2006. – 256 с.
5. Fischer, W. (1975) Eine Methode zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von Kettenwerk und Stromabnehmer bei hohen Zuggeschwindigkeiten (A method to calculate the vibration behaviour of overhead contact line and pantograph at high running speeds). TH Darmstadt 1975, dissertation thesis.
6. Hobbs, A. E. W. (1977) Accurate prediction of overhead line behavior. In: *Railway Gazette International* 9, 339 - 343.
7. KieBhng, F., Semrau, M., Tessun, H., Zweig, B.-W. (1994) Die neue Hochleistungsoberleitung Bauart Re 330 der Deutschen Bahn (The new high performance overhead contact line type Re220 of German Railway). In: *Elektrische Bahnen*, 92, 8, 234 - 240.
8. Roman Konieczny (n.d.) Symulacja uspotracy dynamiczney kilku adbierakow pradu z siccia trakcyjna.

Trakcja i Wagony, 19X4, 3, 84-87.

9. Diana, G., Cheli, F., Resla, F., Miotto, F. (1996) Controllo attivo nei pantografi per treni ad alta velocita. *Ing. Ferrov*, 51, 4, 197-217, 241.
10. Ефимов, А. В. Разработка методики расчета взаимодействия токоприемников с контактной сетью [Текст] / А. В. Ефимов // Вестник Академия Транспорта. Уральское межрегиональное отделение. – Курган: Издательство Курганского государственного университета, – 1998. С. 47 – 49.
11. Галкин, А.Г. Разработка модели динамического взаимодействия контактной подвески с токоприемниками ЭПС [Текст] / А.Г. Галкин, Н.А. Кузнецов // Сб. науч. тр. УрГУПС. – Екатеринбург. – 2000. – Вып. 13 (95): Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог. – С. 49 – 52.
12. Brodtkorb, A., Semrau, M. (1993) Simulationsmodell des Systems Stromabnehmer-Oberleitungskettenwerk (Model for the simulation of the interaction between overhead contact line and pantograph). In: *Elektrische Bahnen*, 91, 4, 105- 113.
13. Link, M. (1981) Zur Berechnung von Fahrleitungsschwingungen mit Hilfe frequenzabhängiger finiter Elemente (Calculation of overhead contact line vibrations by means of frequency dependent finite elements). *Ingenieur-Archiv*, 51, 45-60.
14. Доманський, І. В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями [Текст] : монографія / І. В. Доманський // НТУ „ХПІ”. – Харків: вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
15. Доманский, И. В. Моделирование взаимодействия контактной сети и токоприемников с применением частотно-зависимых конечных элементов и учетом взаимосвязи механического и электрического расчета подвесок [Текст] / И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2011. – №5. – С. 9–14.
16. Максимчук, В. Ф. Результаты моделирования взаимодействия контактной сети и токоприемников на экспериментальном участке скоростного движения направления Киев – Полтава – Донецк. Оценка статических и динамических параметров [Текст] / В. Ф. Максимчук, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 25 – 31.

References

1. Markvardt, K.G. (1994) Overhead contact line (4th ed.). Moscow: Transport, 335. Textbook for universities of railways.
2. Miheev, V.P. (2003) Overhead contact lines and power transmitting lines. Moscow: Marshrut, 416. Textbook for universities of railways.
3. Kiesling, F., Puschman, R., Schmieder, A. (2001) Contact lines for electric railways planning design implementation. Berlin and Munich. Siemens, 822.
4. Vologin, V.A. (2006) Interaction of pantographs with overhead contact lines. Moscow: Intext, 256.
5. Fischer, W. (1975) Eine Methode zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von Kettenwerk und Stromabnehmer bei hohen Zuggeschwindigkeiten (A method to calculate the vibration behaviour of overhead contact line and pantograph at high running speeds). TH Darmstadt 1975, dissertation thesis.
6. Hobbs, A. E. W. (1977) Accurate prediction of overhead line behavior. In: *Railway Gazette International* 9, 339 - 343.

7. KieBHng, F., Semrau, M., Tessun, H., Zweig, B.-W. (1994) Die neue Hochleistungsüberleitung Bauart Re 330 der Deutschen Bahn (The new high performance overhead contact line type Re220 of German Railway). In: *Elektrische Bahnen*, 92, 8, 234 - 240.
8. Roman Konieczny (n.d.) Symulacja uspotracy dynamiczney kilku adbierakow pradu z siccia trakcyjna. *Trakcja i Wagony*, 19X4, 3, 84-87.
9. Diana, G., Cheli, F., Resla, F., Miotto, F. (1996) Controllo attivo nei pantografi per treni ad alta velocita. *Ing. Ferrov*, 51, 4, 197-217, 241.
10. Efimov, A.V. (1998). Developing of calculation methodology for the process of interaction of pantographs with an overhead contact lines. *Bulletin of Transport Academy. Ural interregional department*. Kurgan: State Kurgan university's publishing office, 47 – 49.
11. Galkin, A.G., Kuznetsov, N.A. (2000). Developing of the model for the process of dynamic interaction between overhead contact line and pantograph. *Scientific papers digest of UrGUPS Yekaterinburg (Improving the reliability of power supply devices for railways)*, 13 (95), 49 – 52.
12. Brodtkorb, A., Semrau, M. (1993) Simulations modell des Systems Stromabnehmer-Oberleitungskettenwerk (Model for the simulation of the interaction between overhead contact line and pantograph). In: *Elektrische Bahnen*, 91, 4, 105- 113.
13. Link, M. (1981). Zur Berechnung von Fahrleitungsschwingungen mit Hilfe frequenzabhängiger finiter Elemente (Calculation of overhead contact line vibrations by means of frequency dependent finite elements). *Ingenieur-Archiv*, 51, 45-60.
14. Domanskiy, I.V. (2016). Fundamentals of energy efficiency of electric systems with traction loads (monograph).

NTU „HPI”, Kharkov: publishing office of LLC «Center of transport information in Ukraine», 224.

15. Domanskiy, I.V. (2011). Modeling of interaction between the contact line and pantographs with an application of frequency dependent finite elements and considering the cross connection of mechanical and electric calculations of suspensions. *Railway transport of Ukraine*, 5, 9-14.

16. Maksimchuk, V.F., Domanskiy, I.V. (2012). The results of modeling the process of interaction between an overhead contact line and pantographs in the experimental section of the high-speed railway connection of Kiev - Poltava - Donetsk. Evaluation of static and dynamic parameters. *Railway transport of Ukraine*, 1, 25-31.

Рецензент: доктор технічних наук, професор В. Ф. Харченко, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Автор: ДОМАНСЬКИЙ Валерій Тимофійович
доктор технічних наук., професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dvt.nord@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6676-0780>

Автор: ПЕРЕВЕРЗЄВ Костянтин Вячеславович
директор представництва у м. Києві
ТОВ "ДАК-ЕНЕРГЕТИКА"
E-mail – k.pereverzev@i.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5618-5871>

MODELING AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INTERACTION BETWEEN THE CONTACT LINE AND PANTOGRAPHS

V.T. Domanskiy¹, K. Pereverzyev²

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

² «DAK-ENERGETIKA» LLC, Ukraine

A resource saving approach is considered on transition from the maintenance of the overhead contact line (OCL) on a base of existing standards to a condition based maintenance when the complex diagnostics of its elements can give a significant effect. To improve the quality of diagnostics and to provide an advanced services, it is necessary to develop and refine the models of failures, loads, interactions of the OCL and pantographs and the interconnection of models, theory and methods of operation that cover the whole life cycle of the OCL.

The interaction of OCL with pantographs is an extremely specific and complex process which involves both systems with distributed parameters and systems which have conditionally concentrated parameters. Such complexity of a given process is making researchers to implement and constantly improve mathematical modeling methods. An overview of existing imitating models will give an understanding of an approach for using proper models in design and analysis of OCL behavior. Models that take into account the distributed parameters and a large number of external factors are definitely worth of being implemented.

Using a modern means of OCL diagnostics based on a non-contact stereoTV and infra-red systems together with an OCL-pantograph contact dynamic system all being synchronized with a video with a subsequent computer processing is a new source of data that were obtained and clarified during an inspection trips on a new modern laboratory-car. The results of the measurement of the contact pressure prove an interconnection between a quality adjustments of the suspension with a quality of the process of collecting current by pantograph.

A combination of experimental and simulated dependencies of the contact pressure at different velocities in the spans of the anchor sections shows a great opportunity for sustainable development of current collecting quality. Proposed development of such models based on frequency-dependent finite elements analysis and structuring of mechanical and electrical parts of the anchor spans of graphs, that allows to define the parameters OCL considering a thermal wear.

Keywords: contact lines of railways, maintenance and diagnostics, interaction of OCL with pantographs